黄河流域发展质量综合评估计算方法研究

张远生[1]，练继建[2]，金鑫[3,*]，曹智伟[3]，赵焱[3]，罗秋实[3]，鲁俊[3]
(1.天津大学，天津市 邮编300072；
2.河北工程大学，河北邯郸 邮编056000；
3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南郑州 邮编450003)

摘要：本研究从系统思维的角度出发，采用信息熵和耗散结构理论，计算流域发展指数，初步构建出科学的流域发展质量综合评估方法体系，对黄河流域复杂系统近40年的演变进行综合评价及分析。在对指标进行熵权分析中看出，流域人均GDP与全国平均比值及黄河下游总淤积量两个指标在多年中占据了最大权重，在不同的历史时期对流域发展影响相对较大。在整个40年时间段内，BDI的取值在1996年的50.5分到2019年的66.6分之间变化，总体上先降低后升高。黄河流域BDI的演变规律与流域整体发展规律相符，并与影响流域发展的重大事件有较大关联。本研究方法可推广到区域治理等领域，相对于以经济指标为主的评价模式，本方法更具系统性、科学性，将更好的服务于科学决策。

关键词：信息熵；耗散结构；复杂系统；系统治理；黄河流域；流域发展指数；高质量发展
中图分类号： **文献标识码：**A

1 流域发展质量评估分析方法研究概况

历史上，黄河洪涝灾害频繁，从大禹疏导洪水，到潘季训束水攻沙治河，再到近代治河，黄河治理是以防洪减灾为主，主要从灾害发生频次、灾害损失等方面评价河道治理水平[1, 2]。人民治黄以来，开展了大规模的黄河治理保护工作，提出了“上拦下排、两岸分滞”控制洪水和“拦、调、排、放、挖”综合处理泥沙，主要利用实测资料分析、数学模型计算和物理模型实现等手段，从防洪、减淤等有限角度选择一个或数个有限指标，评价治理保护效果。当前，黄河治理正在由传统以防洪减灾为主，向综合治理、系统治理转变。从系统思维的角度来看，黄河流域是一个复杂巨系统，流域内河流、经济社会和生态环境等多方面相互博弈，在演变过程中此消彼长，显而易见，传统方法从防洪、减淤等角度采用有限指标，很难完整地、系统地评估流域综合发展质量，有学者试图从系统论的角度评价黄河治理水平，例如黄燕芬[3]等受到欧洲莱茵河流域协同治理的启发，对黄河流域治理现状进行了定性分析；刘建华等[4]采用了“单指标量化－多指标综合－多准则集成”方法，对黄河流域生态保护和高质量发展协同度进行了定量评估；彭祥[5]从黄河流域水沙关系的重要性和水资源利用角度，提出黄河治理手段需要从系统性角度考量，给出了定性的对策建议；徐国宾[6]、艾南山等[7]利用熵理论和耗散结构理论，对黄河河道演变现象进行了分析；畅建霞等[8]利用耗散结构和熵理论对水资源复杂系统演化方向进行了判别。总体来看，这些研究多是以定性分析为主，评价维度也存在局限性，未包含河流、经济社会和生态环境等的全部内容。

熵理论被认为是20世纪最伟大的发现之一，自创立以来，被用在各类领域的不同系统中。耗散结构理论作为复杂性科学的一个重要分支，是系统科学发展的新阶段，为众多跨学科研究提供了坚实的理论基础[9]。在许多复杂问题研究中，熵理论和耗散结构理论经常被综合运用、同时讨论。为了科学评估流域发展状态及演变趋势，支撑流域管理和治理保

本文系中国工程院咨询研究项目（项目编号：2019-XZ-65）的研究成果之一。

护决策，本文综合运用热力学熵、信息熵、耗散结构等理论，系统分析了黄河流域系统近40年的发展演变规律，创建了流域发展质量综合评估指标体系和评价方法，为流域的系统治理和高质量发展提供了科学完整的决策手段。

2 理论与方法

2.1 总体思路

黄河是一个复杂的巨系统，系统发展质量可以从多种视角进行定义评价，本次从河流的自然属性、社会属性和生态属性考虑，综合运用信息熵、耗散结构等理论，对流域发展质量进行综合评价。具体思路是首先建立流域发展质量综合评价指标体系，再利用可能度函数计算不同评价指标的信息熵，最后利用耗散结构理论，对流域发展状态进行综合评价，提出流域发展指数。研究总体思路见图1。

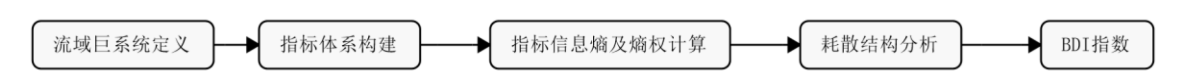


图 1 流域发展指数分析流程

2.2 基于发展状态分析的流域评价思路

流域巨系统内时时刻刻存在着无数不同层次和规模的演变过程，为了对其进行宏观量化和分析，本研究利用数学归纳的思想，将巨系统内部所有演变过程归纳为两类——正向熵变和负向熵变[10]，这两类变化之间存在复杂的协同和博弈，共同影响巨系统的发展走向及状态变化。基于对黄河流域复杂巨系统的定义和已建立的黄河流域发展质量指标评价体系，将全体指标区分为正向和负向熵变指标两类，以此作为对系统进行耗散结构状态分析的基础。

2.3 评价指标体系的信息熵计算方法

为了量化分析系统内的正向熵变和负向熵变效应，需要计算系统各指标的信息熵演变。评价指标数据是一类取值信息不明确的数值，也称灰数，根据灰色系统理论[11]，可通过可能度函数（possibility function）来描述各指标取不同数值区间的“可能性”大小，充分挖掘指标取值所蕴含的信息。本研究中，根据国家标准、规范规程、国际认可的指标标准以及类似研究的最新成果，将各指标发展质量划分为优、良、中、差四个等级并给出相应阈值，基于确立的指标标准区间，可以计算指标的可能度函数，从而量化该要素指标的发展状况。本研究采用了典型可能度函数的改进版本——指数型可能度函数[12]，限于篇幅，函数计算细节本文不再赘述，在下文中，可能度函数用f^k表示。

基于可能度函数的信息熵的计算方法已在多个领域中进行了广泛应用。胡汉梅[13]等将信息熵和熵权法引入传统灰色聚类分析中，通过构造梯形白化函数对变压器故障类型进行分析和判断。刘力[14]同样在灰色聚类的基础上引入信息熵的概念，构造了典型指数白化权函数，摒弃了传统灰色聚类中“零权重”问题，建立了基于灰色信息熵聚类的洪水灾害识别方法。杨腾腾[15]利用熵值法和白化权函数聚类分析法对上市公司的绩效进行评价，客服传统评价方法中只对评价对象绩效值排序这种绝对性缺陷，得到了基于客观信息的综合性评价分析方法。本研究中，基于可能度函数的信息熵值按以下公式进行计算。

$$S = -\frac{1}{\ln n}\sum_{k=1}^{n}(p_k \ln p_k) \tag{1}$$

$$p_k = \frac{f^k}{\sum_{i=1}^{n} f^i} \tag{2}$$

式（1）和式（2）中，n代表指标值标准区间的个数，p_k代表各标准可能度函数值在所有值中的比重。不难发现，在取值较大或较小时，随着取值远离中间标准区域，几个指标等级对应的可能度函数值将向更集中的趋势演变，直接导致熵值的减小。根据这一发现，考虑到熵值减小对系统的有益性，结合指标的越大越优或越大越劣的性质，本研究提出新的信息熵计算方法，将熵值的计算过程做相应的修正，即根据指标极性，修正较差指标值所对应的熵值计算过程。对于越大越优的指标，可以将取值小于良、中两个标准的分界值的指标取值所对应的熵值修正，计算方法见式（3）。对于负极性的指标，用类似方法，相应翻转较大取值（右侧）区间即可，修正后的熵值曲线总体单调递增。对所有的熵值统一做上述修正，不会影响我们利用熵值的变化规律来衡量系统发展的优劣。

$$S' = (2 * S_{mid} - S) / 2 \tag{3}$$

式（3）中，S代表某指标原熵值，S'代表修正后的熵值，S_{mid}代表该指标良、中两个标准分界值对应熵值。修正后的熵值曲线总体单调递减，见图2中带圆圈标记的曲线。

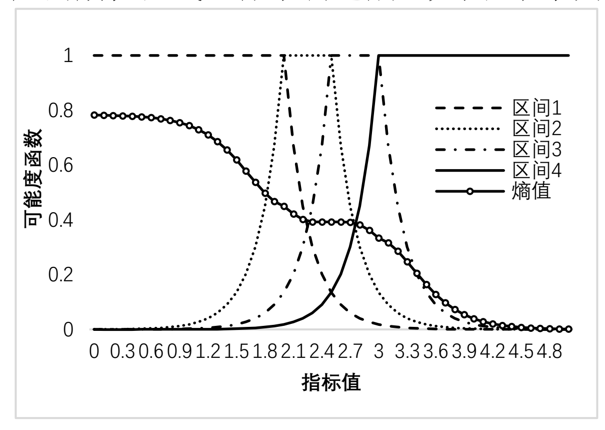


图2 可能度函数及修正计算后的信息熵值曲线

用上述方法修正后得到的熵值曲线，不管对于原始数值越大越优，还是越大越劣的指标，其优秀取值范围所对应的信息熵值均较小。这样一来，就在指标值的优劣性和对系统产生熵增熵减的效应之间，建立了直接相关的联系。信息熵就可以作为一个当量，像一把尺子一样，统一了系统中所有指标的量纲和单位，直接量化每个指标对系统发展产生的影响。

对于每一个评价指标，均可利用熵权法计算其信息熵权重，进而判断流域巨系统中哪一个或几个指标对系统有序的贡献最大，即最重要。信息熵是信息量和不确定性的度量，某指标带来的信息量越大，熵值越低，不确定性就越低，也就可以赋予其较大的权重。熵权法避免了不同专家主观判断权重带来的差异，其更大意义在于，随着各指标信息熵值的变化，每个指标在系统中的权重也随之变化，可以实时监测。指标的信息熵权用式（4）求得，利用各指标的熵值和权重，对正向和负向熵变体系内指标熵值进行加权求和，如式（5）和式（6）中所示。

$$w_i = \frac{1 - S_i}{N - \sum_{i=1}^{N} S_i} \tag{4}$$

$$\mathrm{A} = \sum_{i=1}^{N} (S_{i,\mathrm{A}} * w_{i,A}) \tag{5}$$

$$\mathrm{B} = \sum_{i=1}^{N} (S_{i,B} * w_{i,B}) \tag{6}$$

式（4）和（5）中，N为对应指标的数目，S_i和w_i分别代表对应指标熵值和权重（区分正、负向熵变），A和B分别代表系统的正向和负向熵变总和。

2.4 流域发展状态的量化分析

基于对系统信息熵的计算，本研究进一步引入了耗散结构理论和“布鲁塞尔器”（Brusselator）模型，来评判系统的发展状态。耗散结构（Dissipative structure）理论是比利时物理化学家普利高津（I. Prigogine）于1969年建立的，是热力学发展到非平衡态热力学阶段后产生的一门新兴学科。普利高津[16]认为，在远离平衡态的非线性区，一个开放的热力学系统，通过不断与外界环境进行物质与能量的交换以及其内部的非线性作用，一旦系统参量达到一定阈值，系统就有可能产生自组织现象，继而达到一种高级有序的时空结构，这就是“耗散结构”。耗散结构的形成需要满足四个条件：系统是开放的，系统远离平衡态，系统中存在涨落，系统中存在非线性作用[17]。很明显，流域复杂巨系统具备形成耗散结构的上述条件。

普利高津学派提出的“布鲁塞尔器”模型，正是通过量化分析化学交叉催化反应系统的反应过程，来模拟所有符合耗散结构条件系统在演化过程中的动力学特征。此模型中，用 A 和 B 分别代表两种反应物的浓度，判定该反应系统成为耗散结构的动力学临界条件即为$|B| > 1 + A^2$。即可以利用式（7）计算出每个时间段内的耗散结构指标：

$$Index_{DS} = |B| - (1 + A^2) \tag{7}$$

当耗散结构指标为正值，即两种反应物A和B的浓度满足此数量关系时，系统就会发生跃迁而进入耗散结构状态；反之，当其值为负值时，系统始终处在非耗散结构即稳定的热力学分支；当其值为零时，系统处在两者之间的临界状态。根据上文中阐述，对于流域巨系统，A和B分别可以代表系统的正向和负向熵变总和，即布鲁塞尔器的两种输入反应物的浓度，所以，对化学反应系统的动力学分析可以转译为对流域巨系统的演变状态分析。

式（7）中A和B的取值范围在[0, 1]区间，为使A和B构成的两项在同一数域，即在数值上有可比性，借鉴许多研究中的方法[18]，将负向熵变值B扩大2倍，由此不难得出，耗散结构指标的取值范围在[-2, 1]区间。考虑易于推广的原则，本研究采用百分制为流域发展指数赋分，计算得分时将耗散结构指标取值范围线性转换至[0, 100]区间，得出如式（8）中的转换公式。式（8）中，BDI代表流域发展指数，是综合评价流域巨系统演变状态和发展质量的指标，详细定义已在本研究其他系列文章中给出；$Index_{DS}$代表耗散结构指标。

$$BDI = 100 * (Index_{DS} + 2) / 3 \tag{8}$$

根据投影寻踪聚类方法[19]，利用所有指标取值标准区间的3个临界值，计算指标临界值所对应的耗散结构指标值分别为-0.5、-0.38和-0.23，构成系统状态的3级标准，取系统到达耗散结构（耗散结构指标值为0）条件，共构成4级标准。鉴于到系统到达耗散结构时发展质量较高，综合考虑，取较优的3级标准设置为流域发展指数标准区间的临界值，从而流域系统发展质量与BDI得分换算表，如表1中所示。

表1 耗散结构指标值、BDI得分值与流域发展质量之间的对应关系

耗散结构指标值（$Index_{DS}$）	BDI得分	流域发展质量
-2 ~-0.38	0~ 54	较差

-0.38 ~-0.23	54 ~ 59	中等
-0.23 ~0	59 ~ 67	良好
0~ 1	67 ~ 100	优秀

3 结果与讨论

利用本研究确立的计算方法体系，对黄河流域过去40年的发展质量进行综合性评价。

3.1 指标信息熵分析

利用前文中提到的信息熵修正算法，计算得到修正后的信息熵。从计算结果看，各指标信息熵指标能够跟随反映指标发展变化，对于正极性的指标，指标值越大越优，熵值越小；对于负极性指标，则是指标值越小越优，熵值越小。如图3中“黄河下游冲淤量”这一典型指标的熵值计算结果就符合此规律。冲淤量的取值可正可负，正值代表河道淤积，负值代表河道冲刷。对于系统，冲淤量取值带有负极性，即越小越优。从图3中可以看出，随着黄河下游冲淤量原始值的减小，信息熵值也随之减小，两条曲线的变化趋势和拐点位置一致，这表明用信息熵值度量其指标发展变化具有科学依据。

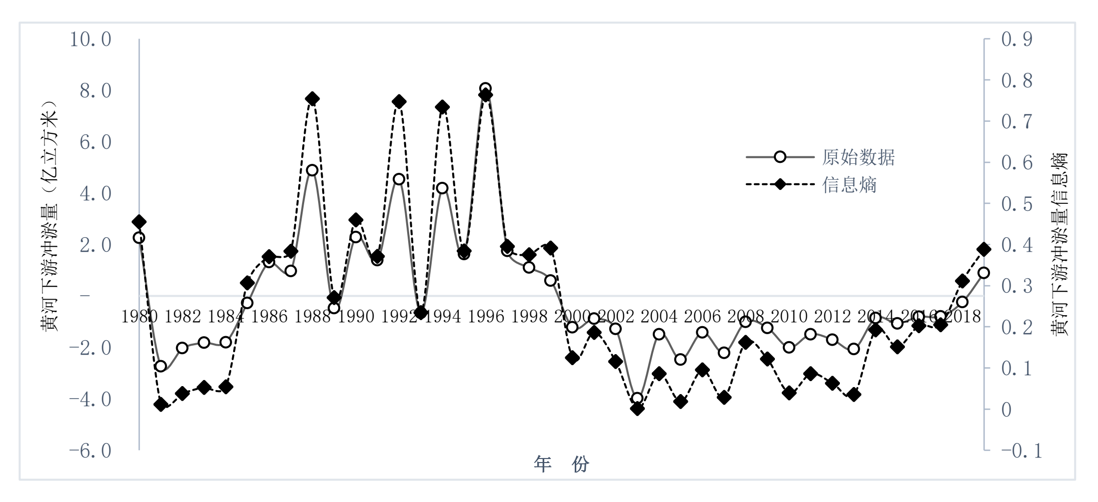


图3 黄河下游冲淤量信息熵计算结果

3.2 指标熵权分析

利用上文中式（4）-（6）中表示的熵权法对黄河流域巨系统历史40年中30个指标的权重相对变化进行计算与分析，图4中显示了系统演变过程中各指标在各年份中作为较大权重出现的概率分布，表2则详细列举了部分较大权重指标出现概率的统计结果。比如第18号指标流域人均GDP与全国平均比值，在40年中有35%的年份（即14年）占据最大权重，有38%的年份（即15年）其权重位居所有指标前三。

通过对较大权重指标的分析，可以看出各指标对系统演变的影响力随时间始终在变化，在不同的发展阶段，各指标相互关系不尽相同，在博弈和协同的作用下，不同指标相继占据最大权重的地位，对系统产生较大影响。在对某时间段的发展演变研究中，可以通过分析最大权重指标的统计学规律，来指导对流域的科学治理——即优先考虑权重较大的指标，重点对这些指标的改善施加有效的治理措施。

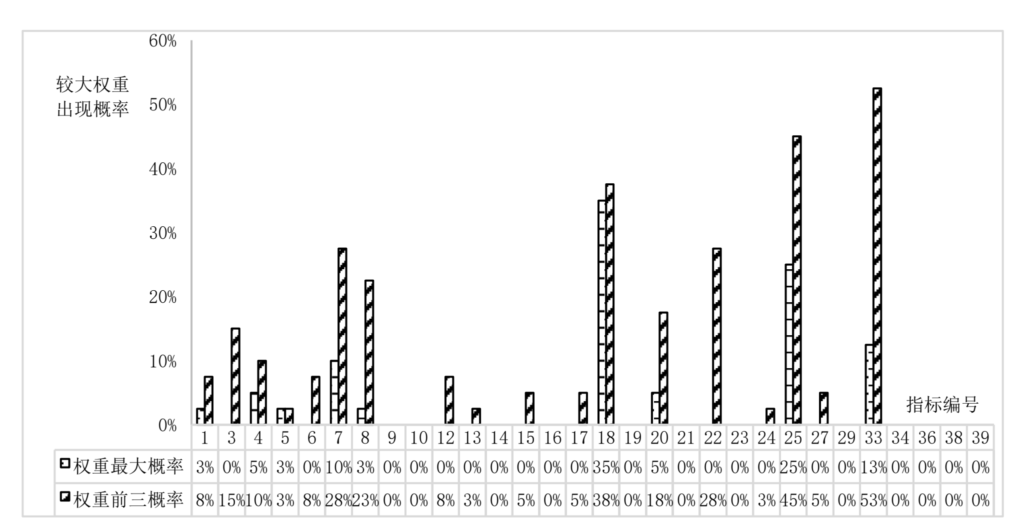


图4 各指标在各年份中作为较大权重出现的概率分布

表2 较大权重指标出现概率的部分统计结果

指标编号	指标名称	子系统	权重最大		权重前三	
			次数	概率	次数	概率
7	物种丰度指数	生态	4	10%	11	28%
18	流域人均 GDP 与全国平均值的比率	人类经济	14	35%	15	38%
25	总冲淤量（黄河下游）	河流	10	25%	18	45%
33	重要断面生态基流保证率	人类经济	5	13%	21	53%

从表2中也可以看出，总体来讲，相对权重较大的指标为第7号、第18号、第25号和第33号指标，而这4个指标分别来自3个不同的子系统，也就代表了各子系统的相对权重分布，同时，此结果也从一定程度上说明本研究中采用的评价指标体系及对各个子系统的划分具有科学性，本评价体系能够反映子系统之间以及与流域巨系统之间的相互影响、博弈的关系。

3.3 流域发展质量分析

对流域巨系统整体的发展质量进行评估，需要通盘考虑全体指标及相应产生的正向和负向熵变效应所带来的影响。图5及表3显示了BDI指数的40年演变情况计算结果。在整个40年的考察区间内，BDI的均值为58.5分，最低值为1996年的50.5分，最高值为2019年的66.6分。在历史40年的时间内，BDI先降低后升高。具体来讲，黄河流域的发展质量经历了“良好-中等-较差-中等-良好”几个阶段。

在20世纪80年代，我国处于改革开放初期，流域内的经济发展属于起步阶段，流域生态环境受到人类活动的负面影响有限。在1985以前，BDI都处在均值以上的水平，流域生态环境质量较高，流域综合发展质量相对较好。1985年以后，BDI波动性下降，1996年达到最低值。该阶段流域经济发展水平逐步提高，但由于经济发展的同时没有足够重视生态环境的保护和流域承载力的维持，导致流域生态环境状况欠佳。在1996年之后，虽然发展波动性仍然存在，但由于流域科学决策、系统治理和重大工程的积极影响，流域系统总体发展趋势向好。尤其在最近10年间，BDI指数的波动性减小，并逐渐接近“优秀”的发展等级。

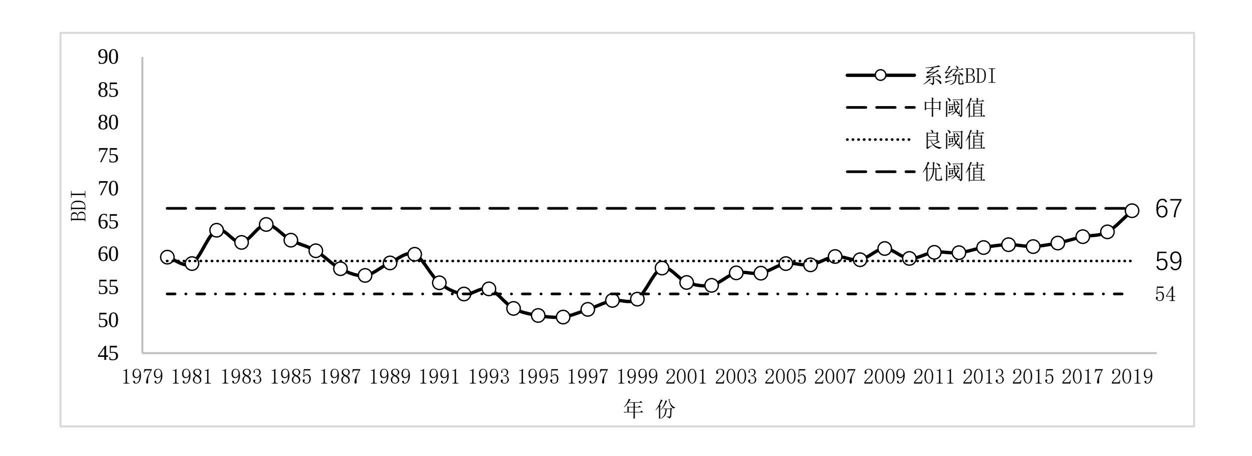


图5 流域发展指数演变曲线及发展等级

表3 流域发展指数计算结果

年份	系统BDI	年份	系统BDI	年份	系统BDI	年份	系统BDI	年份	系统BDI	年份	系统BDI
1980	59.6	1987	57.8	1994	51.8	2001	55.8	2008	59.2	2015	61.2
1981	58.6	1988	56.8	1995	50.7	2002	55.3	2009	60.9	2016	61.7
1982	63.7	1989	58.7	1996	50.5	2003	57.2	2010	59.4	2017	62.7
1983	61.8	1990	60.0	1997	51.6	2004	57.2	2011	60.3	2017	63.4
1984	64.5	1991	55.7	1998	53.0	2005	58.6	2012	60.3	2019	66.6
1985	62.2	1992	54.0	1999	53.2	2006	58.4	2013	61.1		
1986	60.6	1993	54.8	2000	57.9	2007	59.7	2014	61.5		

结合黄河流域发生的重大历史事件[20]做进一步分析黄河流域BDI指数演变。图6展示了黄河流域BDI指数演变以及流域内发生的若干重大事件的关联性。1982年和1984年，黄河水量丰沛，尤其是1984年8月，黄河汛期出现水丰沙少的现象，水沙关系协调度相对较好，致使河流健康指数较优，BDI受其影响较大，也相对较优。1992年8月，渭河支流发生洪水灾害，花园口出现高水位、高含沙洪水。这一年黄河断流现象加剧，其中利津断面断流82天。1995年，黄河全年断流更长达122天。1996年8月，黄河发生96.8特大洪水。这一系列重大事件都导致了BDI的连续下降，直到1996年达到最低值。1997年之后，随着黄河万家寨和小浪底水利枢纽相继下闸蓄水，黄河水量统一科学调度初见成效，加之黄土高原水土流失治理、“三北”防护林及自然保护区建设等生态工程逐渐发挥作用，黄河流域BDI渐渐向好发展，2000年左右达到了一个阶段发展的高峰。从2000年开始，黄河实现全线不断流，并持续向好发展，尤其在2010年以后，表现得更为稳定。这和国家治理政策的改变息息相关。2012年党的十八大以来，习近平总书记多次就水利工作作出重要指示，特别是在2012年提出了生态文明思想；2014年3月，习总书记提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路（“十六字”治水思路）；2017年，打响污染防治攻坚战，一系列科学有力的政策实施，使得黄河流域BDI不断趋好演变。可以看到，黄河流域BDI指数的演变规律与流域内发生的若干重大事件有很大的关联性，流域中发生的重大事件及河流水情的重大变化与BDI指数存在数值和时间上的响应关系。

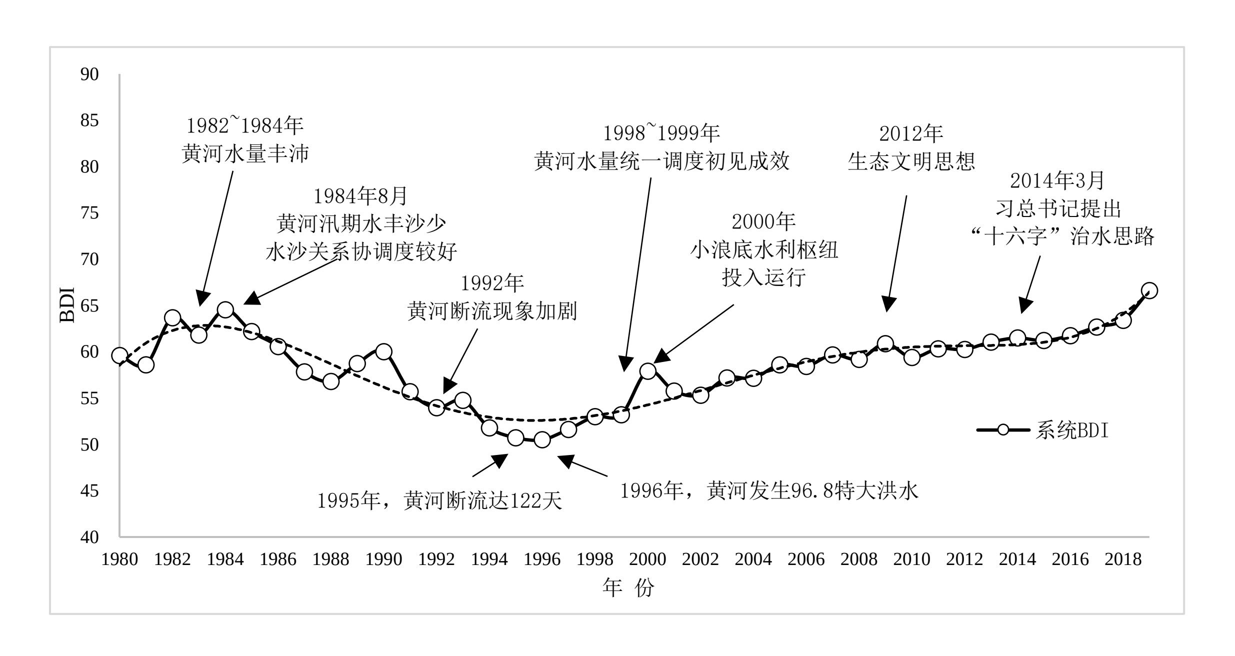


图6 流域发展指数演变与历史大事件关联

需要特别指出的是，在近20年时间内，虽然黄河流域经过了持续不断的治理和改善，但黄河复杂的自然条件、特殊的河情，决定了黄河治理保护的长期性、艰巨性和复杂性，黄河流域系统尚未进入耗散结构状态。当前，洪水风险依然是流域最大威胁，流域生态环境脆弱、水资源保障形势严峻、发展质量有待提高，这就需要治河管理部门在尽力削弱系统内部正向熵变效应的同时，加大外部负向熵变的持续流入。

4 结论与展望

本研究通过对信息熵和耗散结构理论的改进，在河流治理管理领域提出了一套独到的相对完整的评价理论和方法。通过信息论中的信息熵的概念，将系统发展质量归一到熵的当量上来，统一了各个指标的度量，结合耗散结构理论，从系统发展趋势及系统演变的内生动力方面，建立了流域系统发展质量的综合评价方法。利用该方法计算的黄河流域BDI指数的演变规律与流域发展的整体规律相符，并与流域内发生的若干重大事件有很大的关联性。

该研究理论与方法打破了传统“头痛医头、脚痛医脚”的治河理念以及线性思维，通过自然科学与社会科学的深度交叉，建立科学的系统模型，为黄河流域水战略布局及重大项目前期规划论证提供决策依据。同时，本研究中提出的流域发展指数及相关理论方法，可以推广到区域治理等其他领域，相对于目前以经济指标为主的评价模式，这种理论方法更具系统性、科学性，必将更好的服务于科学决策。

参考文献：

[1] 杨佩国， 戴尔阜， 吴绍洪， 等． 黄河下游大堤保护区内洪灾风险的空间格局[J]． 科学通报， 2006,51(z2): 148-154.

[2] 苏人琼， 杨勤业． 黄河流域灾害环境综合治理对策[J]． 人民黄河， 1996(11)： 16-20.

[3] 黄燕芬， 张志开， 杨宜勇． 协同治理视域下黄河流域生态保护和高质量发展——欧洲莱茵河流域治理的经验和启示[J]． 中州学刊， 2020(2)： 18-25.

[4] 刘建华，黄亮朝，左其亭．黄河流域生态保护和高质量发展协同推进准则及量化研究[J].人民黄

河,2020,42(9):26-33.
[5] 彭祥. 黄河流域系统治理的对策建议[J]. 中国水利, 2020(17): 25-27.
[6] 徐国宾，赵丽娜. 最小熵产生、耗散结构和混沌理论及其在河流演变分析中的应用. 科学出版社, 2017.6.
[7] 艾南山，岳天祥. 再论流域系统的信息熵. 水土保持学报, (04):3-11, 1988.
[8] 畅建霞，黄强，王义民，等. 基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究. 水利学报, 2002(11):107-112.
[9] Yue Yang, Ning-Ning Liu, Ming-Yu Sun, and Qi Li. What are the challenges facing cancer therapy base on the dissipative structure theory. Traditional Medicine Research, 4(2):82-90, 2019.
[10] 高吉喜，王永财，侯鹏，等.近20年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究[J]. 水利学报, 2020,51(9): 1157-1164.
[11] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报, 2018,49(9): 1028-1039.
[12] 杨开忠, 董亚宁. 黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策——基于“要素-空间-时间”三维分析框架[J]. 水利学报, 2020,51(9): 1038-1047.
[13] 曾波，李树良，孟伟. 灰色预测理论及其应用.科学出版社, 2020.
[14] 孔繁玲. 论熵变. 理论探讨, 1996(04):40-42.
[15] 刘思峰等. 灰色系统理论及其应用（第八版）[M].科学出版社, 2017.
[16] 赵焱，王明昊，李皓冰等. 水资源复杂系统协同发展研究. 黄河水利出版社, 2017.
[17] 胡汉梅，乔月辉，周律. 改进灰色聚类熵法在电力变压器故障诊断中的应用. 中国农村水利水电, (10):105-107,110, 2010.
[18] 刘力，周建中，杨莉，张勇传. 基于熵权的灰色聚类在洪灾评估中的应用. 自然灾害学报, 19(04):213-218, 2010.
[19] 杨腾腾. 基于GREY-ENTROPY方法的上市公司绩效评价研究. PhD thesis, 复旦大学, 2012.
[20] 普利高津，尼科里斯. 探索复杂性. 四川教育出版社, 2010.
[21] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 清华大学出版社, 1986.
[22] 张铁男,程宝元,张亚娟. 基于耗散结构的企业管理熵Brusselator模型研究. 管理工程学报, 24(3):103-108, 2010.
[23] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用. 科学出版社, 2006.
[24] 黄河水利委员会黄河志总编辑室. 黄河大事记（增订本）. 黄河水利出版社, 2001.
（通讯作者：金鑫 E-mail: xin.obor@qq.com）

Research on Calculation Method for Comprehensive Evaluation of Development Quality of the Yellow River Basin

ZHANG Yuansheng[1], LIAN Jijian[2], JIN Xin[3,*], CAO Zhiwei[3], ZHAO Yan[3], LUO Qiushi[3], LU Jun[3]
(1. Tianjin University, Tianjin300072; 2.Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056000; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Henan Zhengzhou 450003)
Abstract: From the perspective of systematic thinking, this study applied the theories of information entropy and dissipative structure to comprehensively evaluate and analyze the evolution of the complex system of the Yellow River Basin over the past 40 years. With the concept of “Basin Development Index (BDI shortly)”, a preliminary scientific comprehensive evaluation method system of basin development quality is established. Results of the model calculation show that the ratio of per capita GDP in the basin to

the national average and the total sedimentation in the lower Yellow River have occupied the largest weight for many years, and have had a relatively greater impact on the development of the basin in different historical periods. During the entire 40 years, the value of BDI has varied from 50.5 points in 1996 to 66.6 points in 2019, and has generally experienced a decreasing and an increasing stage. The evolution of BDI of Yellow River basin is consistent with the overall law of the basin development and has a great correlation with some major events happened in the basin. In addition, this research method can be extended to other fields such as regional governance. Compared with the current evaluation models mainly based on economic indicators, this novel methodology is more systematic and scientific, and will better serve the decision-making with more scientific thoughts.
Keywords: Information Entropy; Dissipative Structure; Complex System; Systematic governance; Yellow River Basin; Basin Development Index; High-quality development

作者贡献声明：

张远生，练继建：提出研究思路，设计研究方案；

金鑫，曹智伟，赵焱：进行实验，采集、清洗和分析数据，论文起草

罗秋实，鲁俊：论文最终版本修订。